

УДК 621.396.969.181.24

А.Л. Ковтунов, С.П. Лещенко, З.З. Закиров, М.П. Батуринський

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ ОТМЕТОК И ТРАЕКТОРИЙ В ОБЗОРНЫХ РЛС С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ

Проведен анализ алгоритмов отождествления отметок и траекторий, при использовании имеющихся узкополосных и предлагаемых сверхширокополосных сигналов. Предложен алгоритм отождествления отметок цели, при интенсивном маневре, с применением сверхширокополосных сигналов и учета радиальной скорости цели. Показано увеличение вероятности правильной селекции при использовании сверхширокополосных сигналов и учете радиальной скорости цели.

Ключевые слова: вторичная обработка, обзорные РЛС, сверхширокополосные сигналы, селекция отметок, отождествление, радиальная скорость цели.

Введение

Постановка проблемы. Задача отождествления отметок и траекторий является одной из основных задач вторичной обработки радиолокационной информации (РЛИ). Полученные в процессе автосопровождения отметки должны «привязываться» к своим траекториям. С этой целью выполняются операции стробирования и сличения координат экстраполированной отметки с координатами отметок, попавших в строб. Стробирование позволяет отобрать отметки из числа отметок, полученных в последнем обзоре для продолжения сопровождаемой траектории [1].

Очевидно, наиболее сложной проблемой в теории и технике обработки РЛИ является совместное сопровождение нескольких целей, движущихся на небольших расстояниях друг от друга, что, в частности, имеет место при пересечении их траектории или при полете группой. В этих случаях стробы сопровождения перекрываются друг с другом, и полученные (отобранные в стробы) отметки могут коррелировать с несколькими траекториями. Еще более сложной является проблема сопровождения пересекающихся траекторий маневрирующих целей. При выполнении группой целей маневра «змейка» кинематическое уравнение состояния модели траектории цели не соответствует выбранной модели, описывающей движению цели, что приводит к постоянной динамической ошибке, которая может составлять несколько километров. Используемые алгоритмы идентификации отметок, всем удаленным от центра строба отметкам приписывают малый вес, считая их ложными, что приводит к перезахвату смежной траектории и срыву сопровождаемой цели. Поэтому задача разработки алгоритмов, обеспечивающих повышение, вероятности правильной селекции пересекающихся траекторий маневрирующих целей является актуальной.

Анализ литературы. Основными алгоритмами совместного сопровождения группы целей являются:

- алгоритм сопровождения на основе многопотенциальной модели идентификации данных [1–3];
- алгоритм сопровождения на основе модели совместной вероятности идентификации данных (СВИД) [1, 4].

Первый из них является одной из версий метода максимального правдоподобия, а второй реализует квазиоптимальный байесов подход к решению поставленной задачи. Реализация алгоритмов затруднительна в виду высокой вычислительной сложности, поэтому на практике, как правило, применяют упрощенные алгоритмы, в частности, алгоритм "ближайшего соседа", при котором для каждой траектории выбирается отметка, ближайшая к ее экстраполированной точке, то есть имеет наибольшую вероятность принадлежности к сопровождаемой траектории. Остальные отметки считаются ложными и отбрасываются. Используя критерий максимального правдоподобия, можно провести оптимизацию селекции отметок по их отклонениям от центра строба. При этом в качестве истинной отметки следует принять ту, функция правдоподобия которой максимальна, т.е.

$$L(\Delta x_i, \Delta y_i) = \max, \quad (1)$$

где $\Delta x_i, \Delta y_i$ – отклонение i -ой отметки от экстраполированной по координатам x и y . Если величины Δx_i и Δy_i не коррелированы, то функцию правдоподобия можно охарактеризовать двумерным нормальным законом:

$$L(\Delta x_i, \Delta y_i) = (1/2\pi\sigma_{x\Sigma}\sigma_{y\Sigma}) \times \exp(-0.5(\Delta x_i^2/\sigma_{x\Sigma}^2 + \Delta y_i^2/\sigma_{y\Sigma}^2)). \quad (2)$$

Для максимизации необходимо минимизировать показатель степени в (2), т.е.

$$\lambda_i^2 = \Delta x_i^2/\sigma_{x\Sigma}^2 + \Delta y_i^2/\sigma_{y\Sigma}^2 = \min. \quad (3)$$

В соответствии с методом максимального правдоподобия оптимальное правило селекции отметок в стробе заключается в выборе отметки, имеющей минимальное суммарное эллиптическое отклонение от центра строба. При условии $\sigma_{x\Sigma}^2 = \sigma_{y\Sigma}^2$ задача сводится к вычислению квадратов линейных отклонений отметок от центра строба и выбору такой отметки, для которой

$$R_i^2 = \Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 = \min. \quad (4)$$

т.е. ближайшей к центру строба отметки [1].

В [5] показано, что использование в обзорных РЛС сверхширокополосных (СШП) сигналов, которые обеспечивают разрешение элементов цели по дальности и получение дальностных портретов (ДП), при отношении сигнал-шум больших 13-15дБ, приводит к значительному снижению флуктуационных ошибок оценок дальности и азимута для всех типов целей. Пример пачки из 85 ДП СШП ЛЧМ сигнала с девиацией частоты 150МГц отраженного от тактического истребителя F-15, летящего под ракурсом 130°, представлен на рис.1. Где ось D - смещение по дальности, ось T- время с дискретностью равной периоду повторения зондирующих импульсов. В [6] предложен метод измерения радиальной скорости при обработке одной пачки СШП сигналов, отраженных от цели. Метод получения оценки радиальной скорости цели реализуется путем анализа закона, зависимости временной задержки коэффициентов взаимной ковариации дальностных портретов в обнаруженной пачке СШП сигналов относительно центрального ДП который соответствует середине диаграммы направленности.

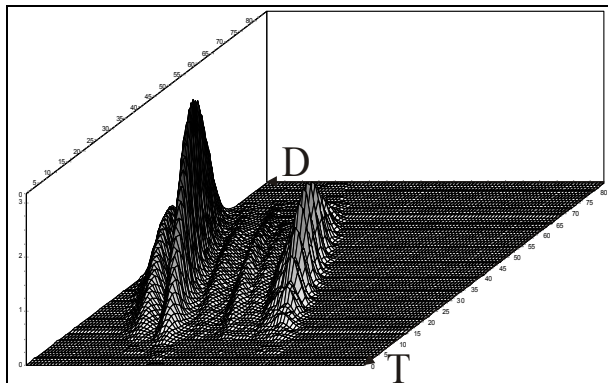


Рис. 1. Пример пачки СШП сигнала, отраженного от тактического истребителя F-15

Это позволяет расширить вектор измеряемых параметров, учесть полученные оценки радиальной скорости в алгоритме экстраполяции дальности, а также в алгоритме отождествления отметок и траекторий. Учет оценок радиальной скорости цели полученной при обработке СШП сигналов позволяет значительно уменьшить динамическую ошибку экстраполяции дальности, вызванную интенсивным маневром цели. В общем виде задача отождествления отметок с учетом информации о радиальной

скорости рассматривался в [7]. Далее рассматриваются возможности улучшения алгоритмов отождествления отметок и траекторий при использовании СШП ЛЧМ сигналов с девиацией частоты внутри импульса $\Delta f = 150$ МГц в обзорных РЛС.

Основная часть

1. Анализ алгоритмов отождествления отметок и траекторий реализованных в существующих обзорных РЛС

В существующих обзорных РЛС отождествление поступающих отметок с трассами, как правило, осуществляется двумя способами: по номеру трассы N_{mp} и по координатам. Отметки, поступающие от оператора, содержат номер трассы и отождествляются по номеру, а отметки типа КТА (контрольная точка автомата) отождествляются по координатам. Если в строб сопровождения попадает несколько КТА, то выбирается ближайшая отметка к экстраполированной точке. В РЛС 19Ж6 расстояние КТА до центра строба, которым являются координаты экстраполированной точки (ЭТ), рассчитывается как:

$$\lambda_{ij} = \left| r_{ETi} - r_{KTAj} \right| + \frac{1}{2} r_{ETi} \left| \beta_{ETi} - \beta_{KTAj} \right|, \quad (5)$$

при условии $\left| r_{ETi} - r_{KTAj} \right| < r_{ETi} \left| \beta_{ETi} - \beta_{KTAj} \right|$; или

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{2} \left| r_{ETi} - r_{KTAj} \right| + r_{ETi} \left| \beta_{ETi} - \beta_{KTAj} \right|, \quad (6)$$

при условии $\left| r_{ETi} - r_{KTAj} \right| > r_{ETi} \left| \beta_{ETi} - \beta_{KTAj} \right|$.

где r_{ETi} - экстраполированное значение дальности на i-м шаге; r_{KTAj} - измеренное значение дальности на j-м шаге; β_{ETi} - экстраполированное значение азимута на i-м шаге; β_{KTAj} - измеренное значение дальности на j-м шаге [8].

В РЛС 55Ж6, с целью упрощения вычислений, расстояние между ЭТ и точкой КТА определяется как сумма модулей рассогласования по дальности и по азимуту [9]:

$$\lambda_{ij} = \left| r_{ETi} - r_{ETAj} \right| + r_{ETi} \left| \beta_{ETi} - \beta_{KTAj} \right|. \quad (7)$$

В РЛС 1Л13 обработка информации ведется в прямоугольной системе координат и расстояние между ЭТ и КТА определяется как сумма модулей разности координат [10]:

$$\lambda_{ij} = \left| x_{ETi} - x_{ETAj} \right| + \left| y_{ETi} - y_{KTAj} \right|. \quad (8)$$

В ЗРК «БУК» вторичная обработка выполняется в ПБУ 9С470 по данным РЛС 9С18. Если в стробе обнаружено несколько отметок, то в качестве истинной принимается отметка с минимальной суммой квадратов разностей координат отметки и экстраполированных координат центра строба [11]:

$$\lambda_{ij} = \left| x_{ETi} - x_{ETAj} \right|^2 + \left| y_{ETi} - y_{KTAj} \right|^2. \quad (9)$$

2. Алгоритм отождествления отметок и траекторий с учетом оценки радиальной скорости, полученной при обработке обнаруженной пачки СШП сигналов

При учете оценки радиальной скорости, полученной при обработке обнаруженной пачки СШП сигналов использование правила выбора «ближайшего соседа» обеспечивает более высокую эффективность селекции отметок, поскольку соответствие между отметкой и экстраполированным положением траектории определяется на основе «близости» как координат, так и значений радиальной скорости [7]. Предлагается селекцию отметок в стробе маневрирующих целей производить с учетом оценки радиальной скорости по выражению:

$$\lambda_{ij} = |x_{ETi} - x_{ETAj}|^2 + |y_{ETi} - y_{ETAj}|^2 + |T_0 \cdot (V_{rETi} - \tilde{V}_{rj})|^2 \tag{10}$$

где V_{rETi} - экстраполированное значение радиальной скорости на i -м шаге; \tilde{V}_{rj} - оценка радиальной скорости на j -м шаге; T_0 - период обзора РЛС.

Выбор метода расчета экстраполированного значения радиальной скорости производился путем моделирования из алгоритмов экстраполяции полиномом второго порядка:

$$\tilde{V}_{rETi} = 3 \cdot \tilde{V}_{rn} - 3 \cdot \tilde{V}_{r(n-1)} + \tilde{V}_{r(n-2)}, \tag{11}$$

и полиномом первого порядка, по двум оценкам радиальной скорости:

$$\tilde{V}_{rETi} = 2 \cdot \tilde{V}_{rn} - \tilde{V}_{r(n-1)}, \tag{12}$$

На рис. 2 приведен пример зависимости радиальных скоростей - измеренной, экстраполированной полиномом первой степени, полиномом второй степени, цели, выполняющей маневр «змейка» от номера измерения при величине СКО ошибки измерения радиальной скорости – 5м/с.

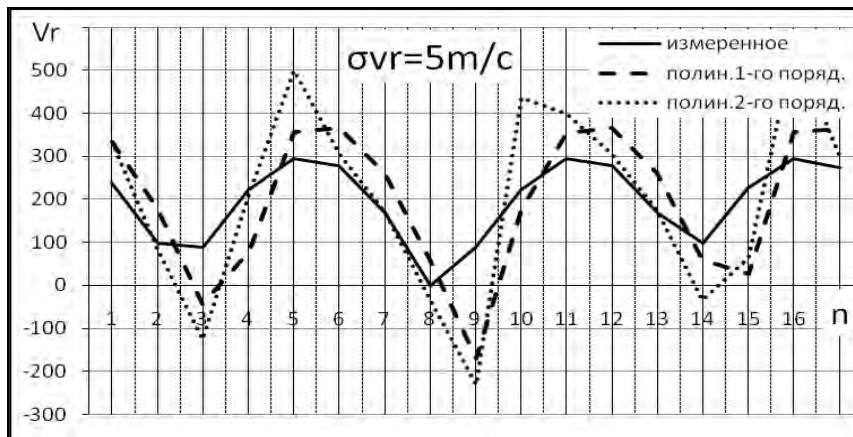


Рис. 2. Пример зависимости радиальных скоростей цели, выполняющей маневр «змейка», от номера измерения

Алгоритм экстраполяции полиномом первого порядка имеет незначительное преимущество по величине среднего отклонения ошибок экстраполяции радиальной скорости. Качество селекции отметок в двухмерном стробе принято оценивать вероятностью правильной селекции $p_{пс}$, под которой понимается вероятность того, что в очередном обзоре для продолжения траектории отобрана именно истинная отметка. В случае селекции в прямоугольном стробе с размерами $\Delta x_{поб} > 3\sigma_{x\Sigma}$ и $\Delta y_{поб} > 3\sigma_{y\Sigma}$ при равномерном распределении в нем ложных отметок вероятность определяется выражением:

$$p_{i\bar{n}} = (1 + 2\nu\sigma_{x\Sigma}\sigma_{y\Sigma})^{-1}, \tag{13}$$

где ν - средняя плотность ложных отметок в стробе. [11]. Дисперсии суммарных отклонений истинных отметок от экстраполированных в прямоугольной системе координат определяются по формулам:

$$\sigma_{x\Sigma}^2 = \sigma_x^2 + \sigma_{xy\Sigma}^2; \tag{14}$$

$$\sigma_{y\Sigma}^2 = \sigma_y^2 + \sigma_{yy\Sigma}^2; \tag{15}$$

где σ_x^2, σ_y^2 - дисперсий ошибок измерения координат; $\sigma_{xy\Sigma}^2, \sigma_{yy\Sigma}^2$ дисперсии суммарных ошибок экстраполяции.

Очевидно, что для повышения $p_{пс}$, необходимо уменьшать как флюктуационные, так и динамические ошибки. Уменьшение этих ошибок позволяет уменьшать площадь селектирующего строба, что приводит к уменьшению средней плотности ложных отметок в стробе. Качество селекции отметок характеризуется, также разрешающей способностью метода селекции. Разрешающую способность метода селекции можно оценить минимальным расстоянием между траекториями, при котором они не перепутываются с заданной вероятностью.

При наличии множества целей в зоне обзора эти показатели могут изменяться вследствие взаимного влияния близкорасположенных целей. Ос-

новним методом определения характеристик в многоцелевой ситуации является моделирование, полунатурный или натурный эксперимент. Методом моделирования показано, что предложенный алгоритм отождествления с учетом радиальной скорости, полученной при обработке СШП сигнала, обеспечивает вероятность правильной селекции равной единице на ракурсах, когда сопровождаемая и близкая к ней цель разрешаются по радиальной скорости.

Существующие алгоритмы приводили к срыву сопровождаемой траектории во всех опытах вследствие низкой разрешающей способности метода селекции траекторий в условиях больших динамических ошибок.

Пример ситуаций сопровождения траектории с отождествлением предложенным алгоритмом и реализованным в РЛС 19Ж6 представлен на рис. 3.



Рис. 3. Пример ситуаций сопровождения траектории с отождествлением предложенным алгоритмом и реализованным в РЛС 19Ж6

Моделировалось движение двух тактических истребителей F-15, выполняющих маневр «змейка» с разворотом на 180° и перегрузкой 2. Цели начинают двигаться с постоянной скоростью 300 м/с с точки O. На сопровождение бралась первая цель. Треугольниками показаны точки экстраполяции, прямоугольниками отметки целей, получаемые на каждом обзоре РЛС. На $n=8$ обороте РЛС положение отметки второй цели оказывается «ближе» чем положение отметки первой цели к экстраполированной отметки на текущий шаг. В алгоритме, реализованном в 19Ж6, это проводило к срыву сопровождаемой траектории и перезахвату соседней цели независимо от отношения сигнал-шум $p_{nc}=0$. Предложенный алгоритм обеспечивал $p_{nc}=1$ вследствие хорошего разрешения целей по радиальной скорости. Однако предложенный алгоритм не обеспечивает отождествление в ситуациях, когда сопровождаемая и близкая к ней цель движутся с близкими радиальными скоростями. Моделирование показало, что вероятность правильной селекции предложенного алгоритма равна нулю в секторе, представленном на рис. 4. При этом средний вектор направления движения направлен на РЛС. Прямоугольниками показаны селектирующие стробы, в которых происходил срыв и перезахват соседней траектории.

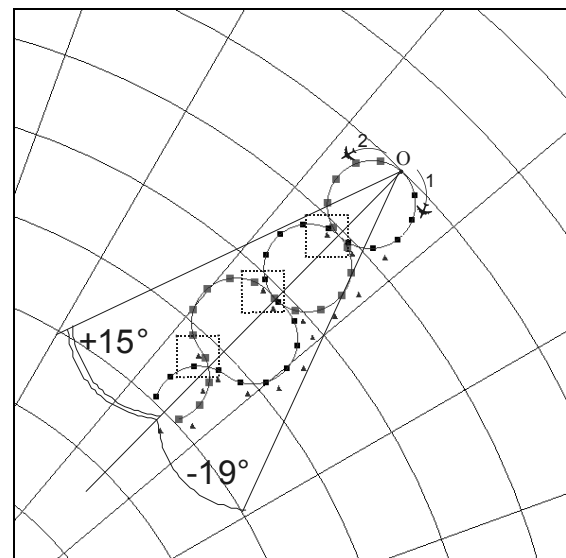


Рис. 4. Сектор, в котором предложенный алгоритм не обеспечивает правильное отождествление отметок и траекторий

Качество отождествления также зависит от дисперсии оценки радиальной скорости. Зависимость вероятности правильной селекции от СКО ошибки измерения радиальной скорости полученной при обработке СШП сигнала для тактического истребителя F-15 представлена на рис. 5.

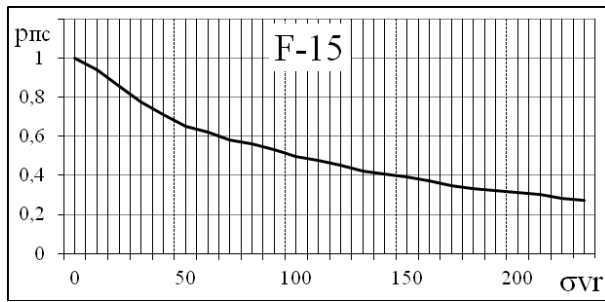


Рис. 5. Зависимость вероятности правильной селекции от СКО ошибки радиальной скорости полученной при обработке СШП сигнала

Для оценки зависимости вероятности правильной селекции от углового положения векторов полята моделировалось движение двух тактических истребителей F-15, выполняющих маневр «змейка» с разворотом на 180° и перегрузкой 2. Цели начинают двигаться с постоянной скоростью 300м/с с точки О. Пример моделируемой ситуации, в которой реализован предложенный алгоритм отождествления, представлен на рис.6. Где g_k - угол между средними направлениями движения целей. На сопровождение бралась первая цель. Треугольниками показаны точки экстраполяции, прямоугольниками отметки целей, получаемые на каждом обороте РЛС. Производилась оценка вероятности правильной селекции на $n=8$ обороте РЛС в зависимости от угла g_k . Угол g_k изменялся от 56° до 40° с шагом 1°. Уменьшение угла g_k на один градус соответствует уменьшению расстояний между траекториями на 1,48 км. На рис.6 представлены три ситуации для различных значений k . Заметно, что предложенный алгоритм обеспечивает устойчивое сопровождение цели во всех конфликтных ситуациях. Моделировалась работа алгоритмов сопровождения и отождествления, реализованных в обзорных РЛС 19Ж6, 1Л13, в ПБУ ЗРК «БУК» 9С470, а также работа предложенного алгоритма. Зависимость вероятности правильной селекции от углового положения векторов движения моделируемых целей и работы алгоритмов отождествления, реализованных в существующих РЛС, представлена на рис. 7. Предложенный алгоритм отождествления обеспечивает наибольшую вероятность правильной селекции и высокую разрешающую способность метода селекции среди моделируемых алгоритмов отождествления. Это обеспечивается уменьшением флюктуационных ошибок дальности и азимута при отношениях сигнал-шум более 13-15дБ, уменьшением динамической ошибки по дальности, при учете оценки радиальной скорости в алгоритме экстраполяции дальности, а также дополнительной селекцией по радиальной скорости в трёхмерном стробе.

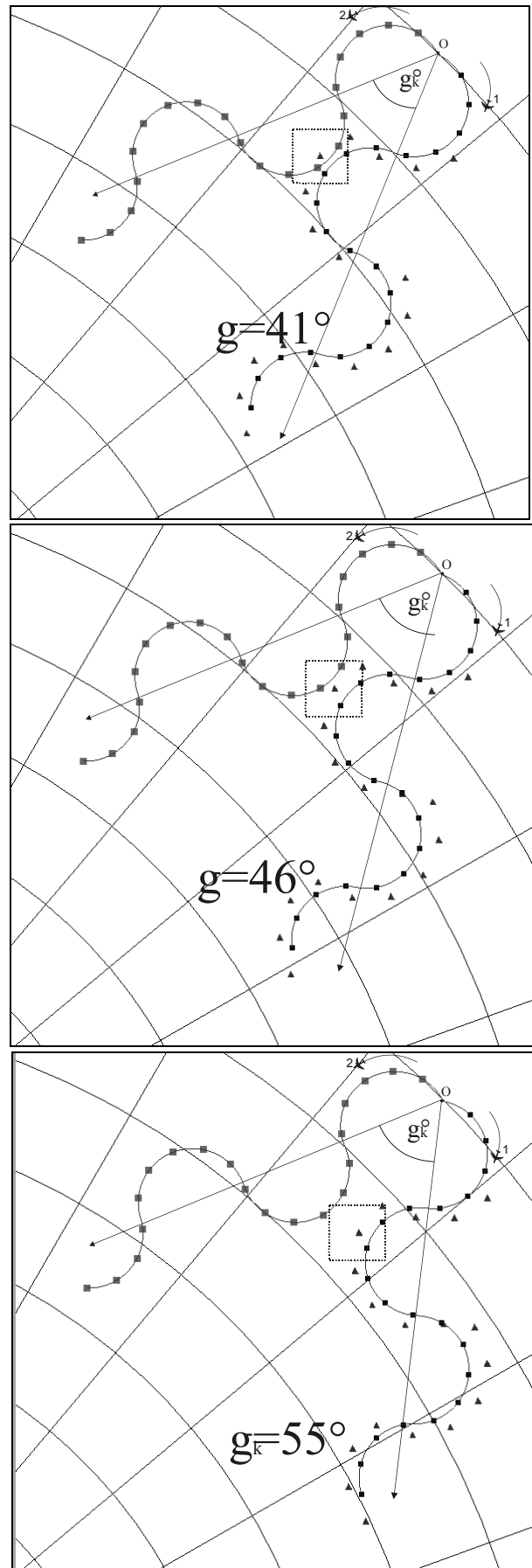


Рис. 6. Горизонтальные проекции моделируемых траекторий, выполняющих маневр «змейка»

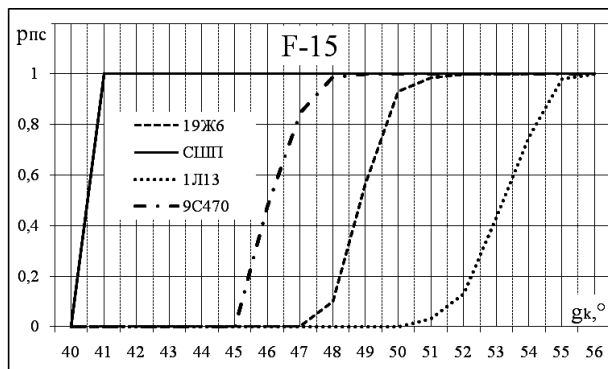


Рис. 7. Зависимость вероятности правильной селекції от углового положения векторов движения моделируемых целей и алгоритмов отождествления

Выводы

1. Применение СШП сигналов с отношением сигнал-шум больших 13-15дБ обеспечивает улучшение разрешающей способности метода селекції и вероятности правильной селекції для всех типов целей, в результате уменьшения СКО ошибок измерения координат дальности и азимута.
2. Применение алгоритма экстраполяции с учетом оценок радиальной скорости цели полученной при обработке СШП сигналов позволяет значительно увеличить $p_{пс}$ и разрешающую способность метода селекції интенсивно маневрирующих целей.
3. Алгоритм селекції группы маневрирующих целей с учетом радиальной скорости цели полученной при обработке СШП сигналов обеспечивает $p_{пс}=1$ на ракурсах, когда сопровождаемая и близкая к ней цель разрешаются по радиальной скорости.

Список литературы

1. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С.З. Кузьмин. – К.: КВиЦ, 2000. – 428 с.
2. Donald B. Read. An Algorithm for Tracking Multiple Targets. // IEEE Trans. on Automatic Control. – Vol. 24. – №26. – 1979. – P. 843-854.

Поступила в редколлегию 1.03.2012

Рецензент: д-р техн. наук проф. О.И. Сухаревский, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ОТОЖНЕННЯ ОЦІНОК І ТРАЄКТОРІЙ В ОГЛЯДОВИХ РЛС ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НАДШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ

А.Л. Ковтунов, С.П. Лещенко, З.З. Закиров, М.П. Батуринський

Проведено аналіз алгоритмів ототожнення оцінок і траєкторій, при використанні наявних вузькосмугових і пропонувананих надширокосмугових сигналів. Запропоновано алгоритм ототожнення оцінок цілі, при інтенсивному маневрі, із застосуванням надширокосмугових сигналів і врахуванні радіальної швидкості цілі. Показано збільшення ймовірності правильної селекції при використанні надширокосмугових сигналів і врахуванні радіальної швидкості цілі.

Ключові слова: вторинна обробка, оглядові РЛС, надширокосмугові сигнали, селекція відміток, ототожнення, радіальна швидкість цілі.

IDENTIFICATION OF MARKS AND TRAJECTORIES IN SURVEILLANCE RADARS USING UWB SIGNALS

A.L. Kovtunov, S.P. Leshenko, Z.Z. Zakirov, M.P. Baturinskiy

The analysis of identification algorithms of marks and trajectories using the given narrowband and proposed UWB signals is performed. The algorithm of marks and trajectories identification with intense maneuver using UWB signals and taking into account the radial target velocity is proposed. Probability increase of correct selection using UWB signals and taking into account the radial target velocity is shown.

Keywords: reprocessing, surveillance radars, UWB signals, marks selection, identification, radial target velocity.